

연료전지 자동차 개발 동향

이 원 용

(한국에너지기술연구소 대체에너지연구부 선임연구원)

1. 머릿글

최근 선진국의 주요 자동차 제작사와 부품회사들이 연료전지 자동차의 상용화를 위하여 경쟁과 협력을 통해 개발을 서두르고 있다. 자동차 제작사들은 2003년에서 2004년에 걸쳐서 상용화를 위한 시범 자동차를 출시하겠다고 공식적으로 발표한 바 있다. 연료전지 자동차는 에너지원으로 연료전지를 사용하는 것으로 연료전지는 공기중의 산소와 연료 중의 수소를 이용하여 전기화학적으로 전기를 발생시키는 것으로 연료와 공기를 외부에서 공급하여 전지의 용량에 관계없이 계속 발전을 할 수 있는 시스템이다. 연료전지는 연료의 화학에너지를 열에너지로의 변환없이 직접 전기에너지로 변환시키기 때문에 효율이 매우 높고 공해가 거의 없는 이상적인 발전시스템이다.

수송분야에서의 석유 에너지절약과 환경공해문제 그리고 지구 온난화 문제 등을 해결하기 위해서는 엔진의 고효율화와 더불어 대체연료의 이용과 공해물질의 저감 기술이 필요하다. 이와 같은 요구를 만족시킬 수 있는 것이 연료전지 자동차로 연료전지를 엔진으로 이용하는 기술이 이미 상당히 진전되어 있으며, 최근에 발표된 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)를 이용한 시범 자동차와 선진국의 집중적인 개발 계획을 통해 앞으로 10년 내에 연료전지를 이용한 자동차의 출현이 기대되고 있다. 연료전지는 자동차 동력기관으로 적용할 경우 기존의 내연기관에 비해 연비를 2배 이상 향상시킬 수 있으며 공해물질의 발생도 거의 없는 장점이 있다. 또한 성능저하 없이 다양한 대체 연료를 사용할 수 있어 석유에너지 절감과 대체에 기여할 수 있다.

2 연료전지 기술

현재 활발히 개발되고 있는 연료전지는 전해질의 종류에 따라 알카리 연료전지, 인산 연료전지, 고분자 전해질 연료전지, 용융탄산염 연료전지 그리고 고체 산화물 연료전지가 있다.

연료전지의 기본 구조는 전해질에 의해 분리된 양극(Cathode)과 음극(Anode), 2개의 전극으로 구성되어 있다. 연료전지내에서 일어나는 2개의 전기화학 반응에 의해 한쪽 극에서 전자가 방출되고 다른극에서 전자를 흡수하여, 두 개의 전극사이에 외부 부하가 연결되면, 전자 흐름에 의해 유용한 전력을 얻게 된다. 이와 같은 연료전지는 일반적인 전지와는 달리, 반응이 되는 물질이 내장되어있지 않고 외부에서 공급되는 연료의 화학에너지를 직접적으로 전기에너지로 변환시키는 변환 시스템이다. 기존의 열기관과는 달리 열에너지로의 변환이 없기 때문에 열기관의 최대효율인 카르노효율에 제한을 받지않고 높은 효율을 실현시킬 수 있다.

운송용 엔진을 위한 연료전지는 부피와 무게가 작고, 즉 동력밀도가 높아야 하며, 가능한 작동온도가 낮아야한다. 이 조건에 가장 잘 부합되는 것이 PEMFC로 연료전지 자체의 연료 변환 효율은 약 55~60% 정도이며 부속 설비를 구동하기 위한 동력 등을 고려할 경우 엔진의 효율은 약 40~45% 정도가 되어 기존의 내연기관에 비해 월등히 성능이 우수하다. PEMFC는 높은 동력밀도, 빠른 시동특성이 있으며, 액체 전해질이 없고, 운전온도도 100℃이하로 비교적 저온으로 취급이 용이하여 자동차용으로 적합한 특성을 가지고 있다. PEMFC는 연료로 수소나 탄화수소를 사용할 수 있으며 산화제로서 산소와 공기를 사용할 수 있다. 주로 메탄올과 같은 대체 연료를 사용하여 개질 과정을

통해 수소 가스를 생성하게 되며, 이것이 연료전지 본체로 공급된다. 스택 내부에서는 백금 촉매에 의해 전기화학 반응이 일어난다.

3. 각국의 연료전지 자동차 개발 현황

연료전지 자동차 개발은 독일의 Daimler benz가 NECAR1~NECAR4 시리즈로 시제품을 발표하였으며 그 뒤를 토요다, Ford등 주요 자동차 회사들이 따르고 있었으나 최근에는 자동차회사들이 합병과 기술 제휴 등을 통해 2003년이나, 2004년까지 연료전지 상용차를 개발한다는 계획을 발표하고 있다.

세계적으로 연료전지를 이용한 자동차의 개발 현황은 표 1과 같다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 주요 자동차 제작사들이 총 망라 되어 있는 것을 알 수 있다.

3.1 직접 수소 방식 연료전지자동차

표 1에 표시된 것 이외에 직접 수소를 탑재하여 사용하는 연료전지 버스로는 260Kw급 연료전지를 사용하는 BPS버스

표 1 연료전지 자동차 개발 현황

제작사	차량 (최고속도, 주행거리)	FC (kW)	연료/ 연계
Daimler	Necar3('97) (120km/h, 400km)	발라드 (50)	메탄올
Chrysler	Necar4('99) *120, 450)	발라드 (50)	액화 H ₂
Renault	Laguna Estate('97) (-, 400)	Denora (30)	액화 H ₂
VW	Concept (130, 400)	-	메탄올/ 축전지
Ford	P2000('99) (130, 160)	발라드 (75)	압축 H ₂
GM/ OPEL	Concept (120, -)	발라드 (30-50)	다중연료/ 축전지
닛산	Concept (120, 400)	발라드 (30)	메탄올/ 축전지
마츠다	Demio('97) (90, 170)	마츠다 (25)	H ₂ 저장합금/ 울트라 축전기
토요다	RAV4('96) (100, 250)	토요다 (20)	H ₂ 저장합금/ 축전지
	RAV4('97) (125, 500)	토요다 (25)	메탄올/ 축전지

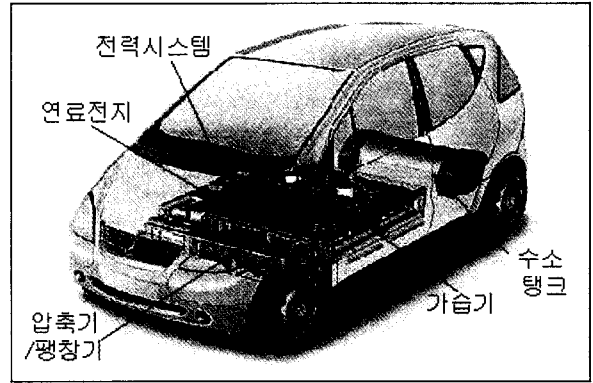


그림 1 NECAR4 수소이용 연료전지 자동차

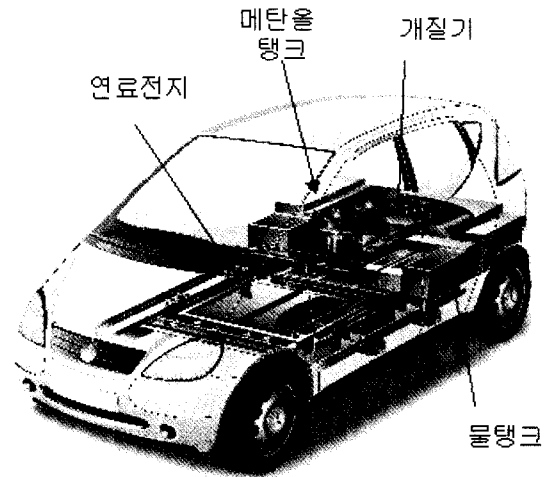


그림 2 NECAR3 개질가스 이용 연료전지 자동차

와 Daimler Benz의 NeBus 가 있으며 NECAR 1, 2가 고압 수소 용기를 사용하고 있다. 1996년의 토요다의 연료전지 자동차(FC-EV/RAV4)는 수소 흡장 함기에 저장된 수소를 연료로하는 연료전지로서 자사제품의 연료전지를 사용하여 1회 충전으로 250km를 주행할 수 있다. Ford는 1999년 압축 수소를 탑재한 P2000 연료전지 시범 자동차를 발표하였다. 또한 1999년에 발표된 Daimler-Chrysler 의 NECAR4는 그림 1과 같이 액화수소를 탑재한 연료전지 자동차이다. NECAR4는 Ford의 자동차와 마찬가지로 승객을 위한 공간을 충분히 확보하고 있으며, 운전거리는 약 450km로 일반 자동차와 차이가 없다.

이들 직접 수소 이용 연료전지 자동차들은 시스템이 매우 간단하고 효율도 높은 장점이 있다. 그러나 연료 공급을 위한 기반시설이 보급되어 있지 않기 때문에 일반 승용차로서는

어려운 점이 있으나, 노선 버스와 같이 일정한 장소를 왕복하는 경우 연료공급시설의 구축에 어려움이 없을 것으로 보이며, 한정된 용도로는 현재로도 직접 수소 이용 방식도 실용성이 있다.

3.2 개질기 탑재 방식 연료전지 자동차

차에 저장된 메탄올을 개질시킨 수소를 연료전지의 연료로 사용할 경우 충분한 주행거리를 확보할 수 있고, 기존의 연료공급 기반시설을 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다. 토요타, 닛산의 연료전지 자동차가 메탄올 개질기를 탑재하고 있다. 그럼 2가 개질기를 탑재한 NECAR3 자동차이다. 1998년에는 GM/Opel에서 메탄올 개질기를 탑재한 실험차를 발표하였다. NECAR3는 메탄올을 연료로 수소를 직접 사용하지 않고 액체 연료를 사용한다는 점에서 주목할 만하다. 그러나 액체 메탄올에서 수소를 생산하는 개질 과정의 복잡성으로 인해 운전석으로 제외하고는 전부 개질기로 채워야 하는 문제점이 있어 실용화된 자동차로는 볼 수 없으며 수소 이외의 연료를 사용하기 위해서는 이를 위한 공정 설비의 크기를 줄이기 위한 연구가 더 필요하다.

4. 선진국의 연료전지 자동차 개발 계획

차세대 동력원으로 주요 역할을 담당하게 될 연료전지 시스템을 개발하기 위해서는 연료전지 스택을 비롯하여 개질기, 동력변환기, 급기시스템, 냉각시스템 그리고 제어기 등의 요소 기술과 이들 요소들을 종합적으로 연계시키고 운영시킬 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 연료전지를 비롯한 대체 동력기관을 위한 평가는 단순히 가격에 의한 경쟁성만을 고려할 것이 아니라, 지역적 공해문제, 온실가스 배출 문제, 효율 향상과 대체 연료 사용으로 인한 원유 수입과 자원문제의 해결 등을 종합적으로 고려하여 결정해야 한다. 가격에는 동력설비 자체의 가격은 물론, 연료비와 기반 시설 투자비를 포함해야 한다. Daimler-Chrysler는 Ford, Ballard와 공동으로 2004년에는 연료전지 자동차를 일반시장에 연 40,000대를 판매하겠다고 발표하였다.

Ford 등 기술을 선도하는 제작사들의 시제품의 제작과 운행 시험을 통해 연료전지 자동차의 기술적인 가능성은 이미 확인되었으며, 현재는 경쟁력 있으며 대량 생산이 가능한 부품과 부위를 개발하여 단위 엔진으로 종합화 할 수 있는 기술의 개발에 초점을 두고 있다. 이것은 지금까지의 기술적 가능성을 보여주기 위한 단계에서 경제적 가능성을 보여주기 위한 단계로 접어들고 있음을 나타낸다.

현재 미국, 일본, 독일 등 선진국 자동차 업계는 초고연비 자동차, 대체연료 자동차 등 차세대 자동차를 위해 정부의 지원하에 업체들이 컨소시엄을 구성하는 등 범국가적 차원에서

기술을 개발하고 있다.

미국의 경우 DOE 주관으로 10년간의 계획으로 자동차용으로 고분자 전해질 연료전지의 핵심기술을 개발하고 있다. 연구 개발은 연료전지 개발자와의 계약과 DOE 산하 국립연구기관인 Los Alamos National Laboratory(LANL)와 Argonne National Laboratory(ANL)의 프로그램에 의해 진행되고 있다. DOE에서는 전해질의 성능한계를 극복하고, 수명 제한 문제 그리고 개질기 반응율 문제를 해결하기 위한 기본 연구에서 고성능 고분자 전해질 연료전지 스택을 위한 기술 개발로 연구영역을 확장하고 있다. 정부의 지원에 의한 요소기술과 스택의 기본 기술 개발을 완료하고, 선택적으로 고성능 저가격 연료전지를 위한 기술개발을 계속 지원할 예정이다. 미국 정부의 자동차용 연료전지는 "Partnership for a New generation of Vehicles(PNGV)" 계획으로 지원되고 있다. PNGV는 1993년에 미국내의 자동차 업계와 정부에 의해 구성되었으며, 근본 목적은 미국 자동차 기술의 경쟁력을 강화시키고 연비 34km/liter의 승용차 개발을 조장하기 위한 것이다. PNGV는 자동차 관련 여러 연구과제들을 조정 독려하여 연비 34km/liter의 차를 개발하려는 목표에 맞추도록 하고 있다. 이를 위해 차량의 무게 감소, 공기 저항 감소, 그리고 고효율 동력원을 개발하고 있다. 초기의 PNGV의 계획에서는 고분자 전해질 연료전지의 비중이 높지 않았으며, 고효율 저공해 동력장치로서 단기 장기적으로 사용 가능성 있는 것으로 인정되어 차세대 자동차 동력기관을 위한 하나의 선택정도로 여겨졌다. 그러나 현재는 연료전지에 대한 관심이 증가되어 연구 예산과 협력 개발을 위한 정부의 지원이 증대되고 있다. 연료전지는 자동차 동력장치 개발을 위한 단기 개발 프로그램으로 추진되고 있을 뿐만 아니라, PNGV에서 근간이 될 수 있는 가장 가능성 있는 시스템으로 인식되고 있으며, 이미 현저한 개발 성과를 성취하고 있다. 미국 DOE PNGV 프로그램에서의 자동차용 연료전지 연구개발 계획을 좀더 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

- 2000년까지 고효율, 저공해 연료전지 시스템 기술 (50kWe)의 개발과 성능 검증
 - 대체연료를 위한 위해 수소 또는 기술린은 물론 메탄올, 에탄올 및 천연가스 등의 연료로 운전 가능한 시스템 개발
 - 25% 출력에서 57% 이상으로 효율 개선을 통한 연비 향상
 - EPA Tier 2 방출보다 100배 이상 청정을 향상으로 공해문제 해결
- 2004년까지 내연기관과 경쟁력있는 연료전지 동력원의 개발과 성능 검증

PNGV에 의한 연료전지 개발 목표는 표 2와 같다.

표 2 차량용 연료전지시스템의 개발 목표 기준

특성 년도	연료전지		개질기		엔진	
	동력밀도 (kW/l)	비동력 (kW/kg)	동력밀도 (kW/l)	비동력 (kW/kg)	cold start (min)	가격 (\$/kW)
2000	0.35	0.35	0.6	0.6	1	150
2004	0.5	0.5	0.75	0.75	0.5	50

미국 에너지성(DOE)의 연료전지 프로그램 연구개발 현황을 정리하면 다음과 같다.

- 연료전지 시스템 개발

가솔린과 대체연료 용이 가능한 50kW 고분자 전해질 연료전지 시스템의 개발을 위하여 2개의 팀(Plug Power, L.C.C./Arthur D. Little과 IFC/Arthur D. Little)이 연구를 수행중에 있다.

DOE는 첨단 PEMFC 스택과 다중 연료 사용가능 개질기 서브시스템을 개발하기 위한 과제를 지원하고 있다. Energy Partners와 Allied Signal-AES는 부분산화 개질기로 작동 가능한 50kW 연료전지 스택을 각각 개발하고 있다. 여기에서는 시스템 효율과 출력 밀도를 각각 57%와 350 W/kg을 목표로 하고 있다. 가격 목표는 대량 생산을 기본으로 100\$/kW이다. Hydrogen Burner Technology는 가솔린, 메탄올, 에탄올 또는 천연가스에서 고품질의 개질가스를 연료전지 시스템에 공급 가능한 50kW, 다중 연료 개질기(CO 정제 포함)를 개발하고 있다. 시스템 효율과 출력 밀도의 목표는 각각 70%와 600W/kg이다. 가격 목표는 대량 생산을 기본으로 하여 30 \$/kW이다.

- 핵심 부품의 연구 개발

DOE 프로그램은 연료전지 시스템의 핵심 부품을 개발하기 위한 여러 개의 중점 연구 개발 과제(산업체와 공동)를 지원하고 있다.

- 급기 시스템을 위한 압축기/팽창기 개발
- 저가의 스택 분리판(Bipolar plate) 개발
- 저가 전해질/전극 집합체(MEA) 개발

이들 과제는 첨단 재료의 연구 개발뿐만 아니라 저렴한 생산 공정의 개발에도 중점을 두고 있다.

유럽연합에서도 1993년도부터 JOULE 프로그램에 의해 연료전지를 수송 분야에 적용하기 위한 연구를 시작하였다. 초기에는 소형 개질기와 개질 가스 이용 연료전지 자동차 종합화 기술에 중점을 두고 연구 개발을 수행하였으나 성능 개

선된 스택을 포함하는 것으로 과제가 진행되고 있다. 현재 1995년부터 2005년까지 10년간의 계획에 의해 연구가 진행중에 있으며, 목표는 가격이 200ECU/kW이고 수명이 5000hr인 저가의 연료전지 시스템을 개발하는 것이다. 과제별로는 2개의 연료전지 스택 개발(6.3 MECU), 6개의 소형 개질기 개발(4.99MECU), 5개의 자동차 종합화 기술(11.5MECU)가 진행되고 있다.

일본은 New energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)에 의해 연료전지 개발 계획이 추진되고 있다. 자동차에 적용될 수 있는 고분자 전해질 연료전지 개발은 민간부분의 투자를 제외하고, 정부에서 지원하는 NEDO의 전체 연료전지 개발 계획중 10% 정도가 사용되고 있다.

Ford는 Daimler Benz와 더불어 2004년에 연료전지 자동차를 생산할 것을 발표한 바 있다. 포드는 고분자 연료전지 엔진 개발을 위해 캐나다 달러로 412.5 백만 달러를 별도의 회사인 DBB에 투자하고 있으며, 추가로 US 달러로 150만 달러를 Eco에 투자하고 있다. 이와 같이 포드는 주요 부품을 생산하기 위해 적극적으로 외부에 투자하고 있으며 여기서 개발된 부품을 이용하여 연료전지 자동차를 조합하려는 계획을 추진하고 있다.

GM 역시 Ford와 마찬가지로 2004년 연료전지 자동차를

표 3 자동차용 연료전지 핵심 기술 보유 현황

회사	스택 생산	스택 제작 기술	파일럿 전단계 생산	정격 용량 스택	스택 기반 기술	단위 전지 기술	MEA 개발/생산	막 개발/생산	촉매 개발	분리판 개발
Ballard	o	o	o	o	o	o	o			o
Benz	o	o	o	o						
G.M.				o	o	o	o			o
Toyota				o	o	o	o			o
Allied signal					o	o	o			o
Denora					o	o	o			o
Energy Partner					o	o				o
Honda					o	o	o			o
Hpower					o	o	o			o
IFC					o	o	o			o
Mitsubishi					o	o				o
Nissan					o?	o		o?		o
Plug Power					o	o	o			o
Siemens					o	o	o			o

생산하겠다는 계획을 발표하였다. 이외에도 일본의 혼다, 토요타 등에서도 연료전지 자동차를 개발하고 있으며 이미 시제품을 발표하였다.

표 3이 자동차용 연료전지의 핵심 기술 보유현황을 정리한 것이다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 주요 연료전지제작회사와 자동차회사가 자동차용 연료전지의 기술의 일부를 보유하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 맺음말

연료전지 자동차는 수송분야에서의 에너지 절약, 에너지원의 다양화, 도시의 환경문제, 그리고 지구 온난화 문제 등을 해결할 수 있는 차세대 자동차의 대표주자로 인식되고 있다.

연료전지 자동차는 기술적으로는 성능이 검증된 상태이지만, 2~3년내에 가격을 대폭으로 줄여야하는 경제적인 문제점이 있으며, 같은 기간내에 생산기술의 개발은 물론 시제품의 시범운전을 통해 신뢰성, 내구성 등의 기술의 불확실성을 완전히 제거해야 할 필요가 있다.

연료전지 자동차의 시장성과 경쟁성을 위해서는 연료의 선택이 중요하며, 순수 수소와 메탄올, 그리고 기존의 가솔린이 대두되고 있는데 연료 공급을 위한 기반 시설과 연료를 수소로 변환시키는 기술 개발 수준을 고려하면 현재로서는 메탄올 변환 기술이 유력하며 CO₂제거를 포함하여 가솔린 변환 기술을 위해서는 연구 개발이 더 필요한 상태이다.

연료전지엔진의 종합 효율을 극대화시키기 위해서는 고효율 요소기기의 개발과 더불어 다양한 주변기기를 최적 종합화시키는 기술이 매우 중요하며 이에 대한 연구가 병행되어 이루어질 필요가 있다.

현재 연료전지자동차의 상용화를 위해서는 가격 저감화와 기반시설 구축 등 다소의 문제가 남아 있지만, 가까운 장래에 연료전지 자동차가 선진국을 중심으로 상용화될 경우 미래 자동차 산업에 큰 변화가 예상되며 국내에서도 자체적으로 이를 개발하기 위한 적극적인 노력이 필요하다. ■

< 저 자 소 개 >



이원용(李元龍)

1960년 4월 3일생. 1979년~1983년 한국항공대학 항공기계공학과 학사. 1983년~1985년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 1987년~1991년 한국과학기술원 기계공학과 박사. 1993년 10월 ~1994년 12월 미국 국립표준기술원 연구원.

1985년~현재 한국에너지기술연구소 선임연구원.